Water Cooling for Large Tubes

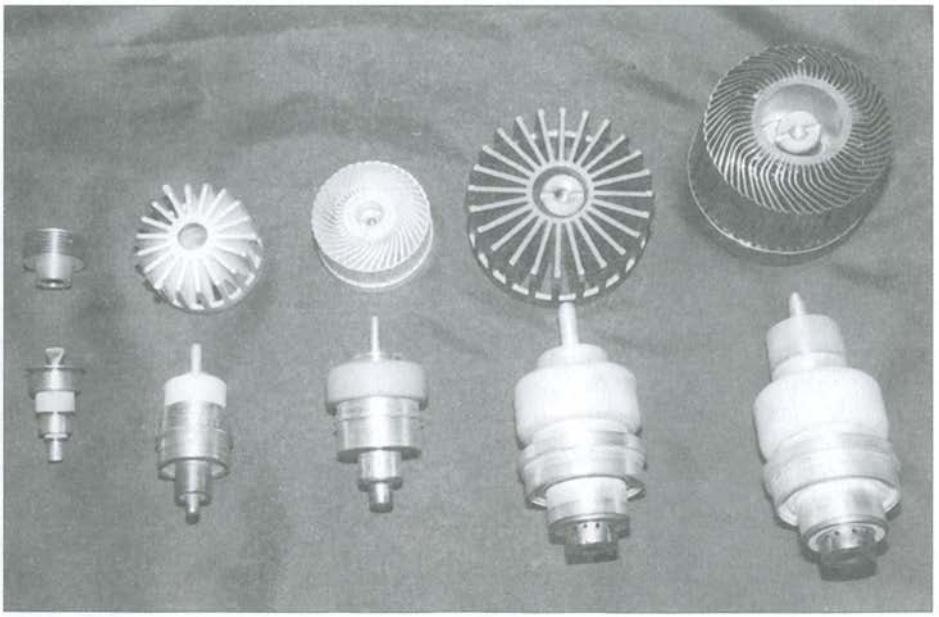
Thomas Höppe, DJ5RE

Blumenstr. 5, D-92245 Kümmertsbruck

Abstract: Water Cooling has been used for years in amateur radio for cooling small planar triodes like the 2C39 to achieve higher power on 23cm. This article describes how real high power tubes like the GS35 can be used effectively and quiet with water cooling.

Kurzfassung: In Leistungsverstärkern für 23cm mit den kleinen Trioden 2C39 ist Wasserkühlung üblich, um die Röhren gezielt überlasten zu können. Das wird benutzt, um genügend Leistung auf 23cm EME zu gewinnen. Hier wird beschrieben, wie man Wasserkühlung für richtige Hochleistungstrioden wie

Fig. 1: Selection of Tubes suited for Water Cooling



die GS35 einsetzt, um einen leisen und temperaturstabilen Verstärker zu erhalten

1. Einführung

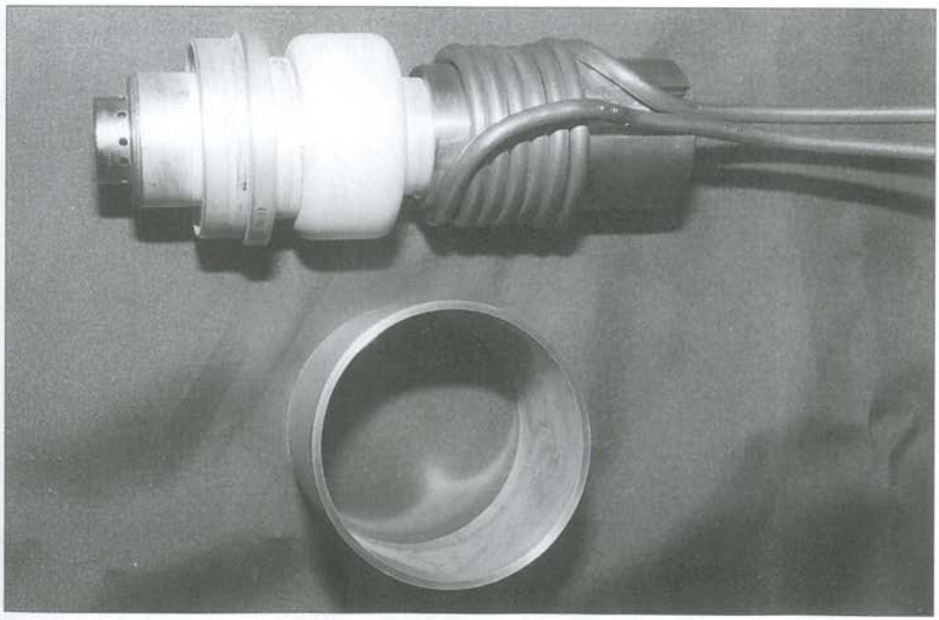
Der vorliegende Artikel beschreibt den Umbau von luftgekühlten Röhrenverstärkern auf Wasserkühlung. Dabei nutzt man die Besonderheit einiger Röhrentypen, den Anodenkühler abnehmen zu können (Foto 1). Eine konkrete Aufbauanleitung soll nicht erfolgen, vielmehr sollen dem interessierten Nachbauer die Kenntnisse vermittelt werden, das Kühlsystem für seinen individuellen Einsatzzweck zu bemessen.

2. Warum Wasserkühlung?

Im industriellen Bereich finden wassergekühlte Röhren dort Verwendung, wo der Einsatz in stark staubhaltiger Luft erfolgen muß, oder wo die Verwendung von geräuschintensiven Radiallüftern unerwünscht ist. Gerade letzterer Aspekt war es, der meinen "Chefmechaniker" Kurt, DL1RCG, und mich bewogen hat, diese Art der Kühlung einmal für Amateurfunkzwecke zu testen. Denn gerade in kleinen Funkbuden, wo der Schall sich nicht verläuft, wird das Empfangen schwächster EME-Signale auf die Dauer zermürbend. Es wird versucht, die Geräuschkulisse des Radiallüfters mit geschlossenen Kopfhörern und entsprechender Lautstärke zu übertönen. Das ist nach einiger Zeit ermüdend, führt sicherlich zu schlechtem Hörverhalten bzw. auf Dauer evtl. sogar zu Gehörschädigungen.

Wer hofft, mit auf Wasserkühlung umgebauten Röhren die Leistungsfähigkeit seiner PA zu steigern, dem sei hier gleich Einhalt geboten. Die Belastbarkeit der Anode wird bei richtiger Ausführung in der Tat verbessert. Die überschlägliche Wärmebelastung der Anodenoberfläche wird bei Wasserkühlung mit 100 W/cm2 angegeben, während bei Luftkühlung nur ca. 30-60 W/cm2 angesetzt werden. Meist wird die maximale Ausgangsleistung jedoch von anderen Parametern, wie z.B. dem Gitterstrom, begrenzt. Gerade im intermittierenden Betrieb wird die Anodenverlustleistung wohl eher selten leistungsentscheidend. Viel mehr gilt es, bei den umgebauten Röhren deren Gesamtkonzeption zu beach-

Fig. 2: View on modified GS35



ten. Viele müssen in ihrer Gesamtheit in die Kühlung mit einbezogen werden, d.h. jeder Kontaktring, jedes Keramikteil und jeder Übergang von verschiedenen Materialien müssen entsprechend den jeweiligen Vorgaben gekühlt werden. Nur bei wenigen Röhren wird auch im kommerziellen Einsatz nur die Anode gekühlt. In unserem Fall wird die Hauptwärmemenge an der Anode durch das Wasser abgeführt. Die übrigen Teile der Röhre hingegen dürfen nicht vergessen werden. Der Kühlaufwand ist jedoch gering, so daß kleine, leise Computerlüfter (axial), unterstützt durch eine Vergrößerung der Oberfläche an den Kontaktringen, hier vollends genügen (Fig. 5,6). Ganz ohne Lüfter kommt man also auch nach dem Umbau leider nicht aus. Das Ziel, eine deutliche Reduzierung des Lärmpegels zu erreichen, wird dennoch erreicht.

3. Welches Kühlverfahren?

In Anbetracht der im Amateurbereich abzuführenden Wärmemenge sowie vom Umweltaspekt her gesehen ist ein offener Kühlkreislauf, d.h. vereinfacht Anschluß der Röhre an einen Wasserhahn und anschließende Entsorgung des erwärmten Wassers über die Kanalisation, völlig undiskutabel. Und nur die wenigsten Funkfreunde werden zudem den Funkbetrieb vom Bad oder gar vom stillen Örtchen aus betreiben!

Was bleibt, ist der geschlossene Kühlkreislauf. Er spart Wasser und ermöglicht zudem den Einsatz destillierten Wassers, welches durch seine Reinheit ausreichend isolativ ist. Zudem sind in ihm keine mineralischen Bestandteile gelöst, welche sich in Form von Kalk bzw. Kesselstein im Kühler oder anderen Bestandteilen des noch zu beschreibenden Kreislaufes festsetzen und diese zerstören. Der Einsatz von echtem destillierten Wasser sei empfohlen. Es kostet nur unwesentlich mehr als nur demineralisiertes Wasser, über dessen Verhalten keine Erfahrungen vorliegen. Gerade der Einsatz von destilliertem Wasser schafft jedoch neue Probleme, die beim Aufbau des Kühlsystems unbedingt beachtet werden müssen. Es ist, bedingt durch seine Reinheit, äußerst ag-

Fig. 3: Finish of the anode cooler

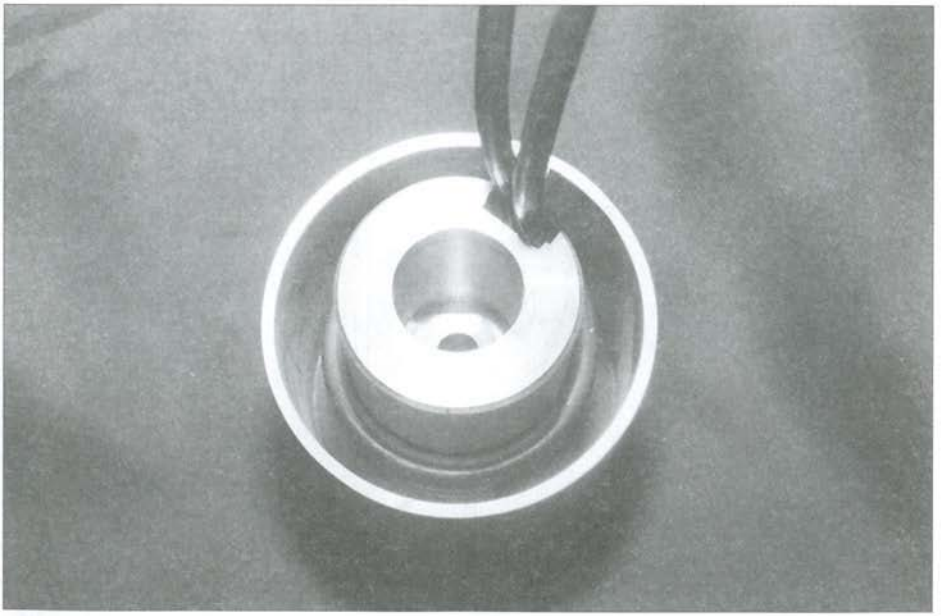
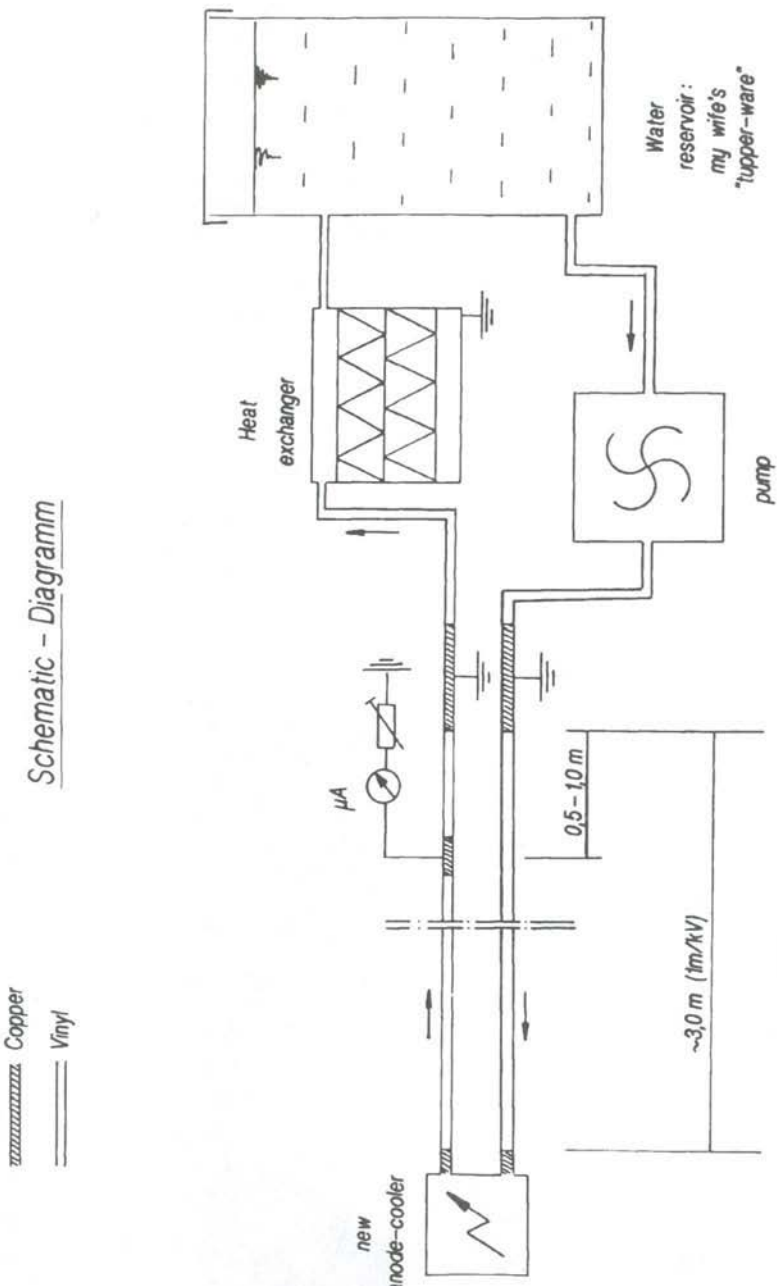


Abb./Fig. 4: Schematic Diagram



gressiv gegenüber bestimmten Metallen und Kunststoffen. Jegliches Herauslösen von Stoffen aus den verwendeten Materialien ist unerwünscht, da zum einen diese Materialien auf Dauer zerstört werden, zum anderen die gelösten Ionen das Wasser verunreinigen und als Ladungsträger die Isolation herabsetzen.

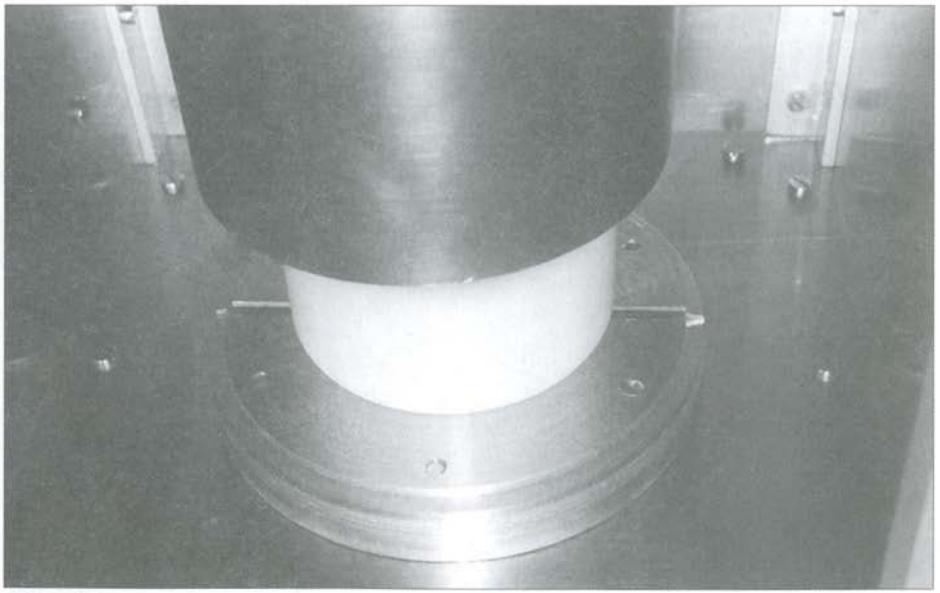
4. Der Kühlkreislauf

Der Kühlkreislauf ist in Abb. 4 aufskizziert. Er muß unter dem Aspekt aufgebaut werden, daß an der Anode die volle Spannung von mehreren KV anliegt. Zudem muß die bereits angesprochene Agressivität des destillierten Wassers Beachtung finden.

Der Anodenkühler

Dieses Bauteil muß sehr sorgfältig aufgebaut werden, damit die Funktion der Ableitung der Wärmemenge in das Wasser auf Dauer gegeben ist. Als Wärmeleiter kommen nur Metalle in Frage. Aufgrund des aggressiven Verhaltens des Wassers sollte für die wasserberührten Teile ausschließlich Kupfer verwendet werden. Messing ist völlig ungeeignet, da es zum Herauslösen der Zinkbestandteile kommt und das Metall sehr schnell zerstört wird. Es bietet sich die Verwendung von weichen, biegsamen Kupferröhrchen aus dem Installationsbereich an. Diese werden meterweise von der Rolle verkauft und sind ab 6mm Außendurchmesser erhältlich. Zunächst wird anstatt des Luftkühlers ein kleiner Zylinder aus Messing angefertigt, welcher auf die Aufnahme der Röhre paßt. Bei Röhren der GI7b-Reihe oder den GS31-Typen genügt eine plane Auflagefläche. Bei den 2C39-Röhren muß das entsprechende Gewinde des aufschraubbaren Kühlkopfes erstellt werden. Bei der hier getesteten GS35b bildet ein Konus den Übergang von der Anode zum Kühlkopf. Wer keinen versierten Metallbearbeiter wie DL1RCG zur Verfügung hat, kann auch den Luftkühlkopf zerlegen, indem die Lamellen entfernt werden. Der übrigbleibende Zy-

Fig. 5: View on Grid Clamp inside the Anode Cavity



linder bildet die Grundlage für den wassergekühlten Kopf. Das weiche Kupferrohr wird nun straff, Wicklung an Wicklung, um den Zylinder gelegt. Dabei genügen 5-7 Windungen völlig, um eine Röhre vom Typ GS35 mit 1,5 KW Verlustleistung zu kühlen (Fig. 2). Der Wärmeübergang vom Zylinder auf die Kühlschlangen ist jedoch infolge der tangentialen Kontaktfläche nicht ausreichend. Ein ausgedrehter Messingzylinder wird über den Wickelkörper mit dem Kupferrohr gestülpt. Der so entstehende Spalt wird nun mit Zinn vergossen (Fig. 3). Dazu hat sich bewährt, das ganze Gebilde auf ein Stück Blech zu stellen und auf eine leistungsfähige Elektroheizplatte gespannt zu erhitzen. Nach dem Ausgießen ergibt sich ein optimaler thermischer Übergang, der nur noch von der Paßgenauigkeit der Kontaktstelle des Röhrenkorpus und des Innenzylinders bestimmt wird. Durch diese Bauweise wird es möglich, bei mit Wasser in Berührung kommenden Teilen ausschließlich Kupfer zu verwenden und maschinell zu erstellende Teile aus leicht zu zerspanendem Messing zu fertigen. Als Zinn sollte kein Lötzinn von der Rolle verwendet werden, der Flußmittelanteil ist zu hoch. Zinn vom Karosseriespengler oder aus einer Lötanlage hingegen ist gut geeignet.

Kühlschläuche

Als Kühlschläuche sollen die isolierenden Schlauchleitungen des Kühlsystems bezeichnet werden. Sie müssen aus isolierendem Kunststoff sein. Schwarze, rußhaltige (UV-Stabilisierung!) Gummi- oder Kunststoffleitungen sind ungeeignet. Es darf kein leitender Füller enthalten sein. Gut eignen sich sogenannte Vinyl-Schläuche, welche in Baumärkten und Gartencentern für Zimmerspringbrunnen oder die Weinherstellung angeboten werden. Diese Schläuche aus klarem Kunststoff gibt es in verschiedenen Innendurchmessern und Wandstärken mit dazu passenden Verbindungen und Reduzierungen aus Nylon. Man sollte einen Durchmesser wählen, der gleich über die verwendeten Kupferröhrchen paßt. Pro Kilovolt Anodenspannung sind ca. 0,5-1,0m Kühl-

Fig. 6: Cathode Cooler

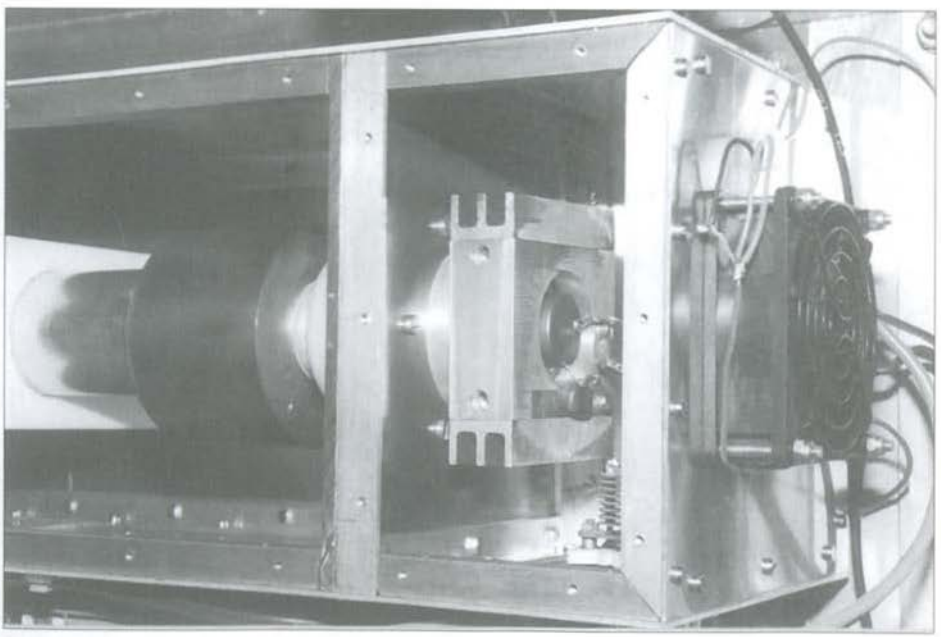
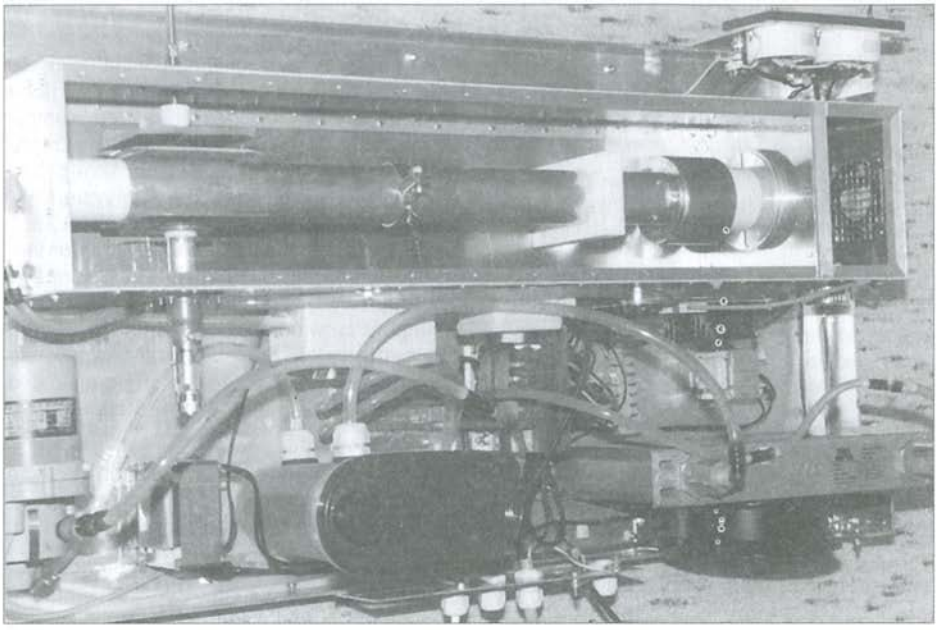


Fig. 7: Water-Cooled 2kW Amplifier for 144MHz



schlauch vorzusehen. Je mehr, desto besser die Isolation :
Es gilt auch hier:

R ~L/Q

- R= Widerstand der Schlauchleitung
- L= Länge der Schlauchleitung
- Q= Querschnitt der Schlauchleitung

Nach diesen beiden ausreichend isolativen Kühlschlauchabschnitten wird geerdet. Dazu werden zwei kurze Abschnitte Kupferröhrchen auf ein Stück MS-Blech gelötet. Vorher werden die Schlauchanschlüsse hochgebogen. Einer der beiden Isolierschläuche kann ca. 1/4 bis 1/3 vom kalten Ende aufgetrennt und ein Kupferröhrchen eingefügt werden. Es bildet sich ein hochohmiger Spannungsteiler aus den Isolierschläuchen. Ein uA-Instrument mit entsprechenden Vorwiderstand wird als "Verschmutzungsanzeiger" gegen Masse eingefügt. Steigt der Strom an, so ist dies ein Indiz für eine Verunreinigung des Kühlwassers.

Der Wärmetauscher

Ein weiter Nachteil des geschlossenen Systems ist die Erfordernis eines Wärmetauschers. Dieser gibt die von der Anode aufgenommene Wärmeenergie an die Umgebung ab. Dabei können sowohl Ölkühler als auch Kühlregister aus KFZ-Heizanlagen verwendet werden. Selbst kleine Ausführungen sind in der Lage, mehrere KW Heizleistung umzusetzen. Ein weitaus größeres Problem ist es, gebrauchte Wärmetauscher derart sauber zu bekommen, daß die Isolation nicht durch Fremdstoffe gefährdet wird. Ein leiser, sehr langsam laufender Flügelradlüfter unterstützt den Luftdurchsatz. Eine temperaturabhängige Drehzahlregelung ist empfehlenswert.

Die Pumpe

Als Pumpen eignen sich Kleinpumpen, wie sie für Aquarien oder Zimmerspringbrunnen in verschiedensten Ausführungen zu haben sind. Dabei sollte auch hier auf wasserberührte Messingteile geachtet werden. Leider sind selbst ansaugende Pumpen nur sehr selten zu bekommen. Ein entsprechender

Vordruck durch einen höher liegenden Wasserstand im Ausgleichsbehälter und tiefer liegender Pumpe löst dieses Problem.

Die Dimensionierung: Faustformel und Versuchsaufbau

Folgende Daten der umzurüstenden Röhre müssen bekannt sein:

- Anodenverlustleistung
- Anodenspannung
-

Die Anodenspannung bestimmt die Länge der isolierenden Schlauchleitungen. Pro KV Anodenspannung sollten ca. 1m Schlauchleitung zwischen Anode und Massepunkt vorgesehen werden.

Weiterhin wird eine Strömungsgeschwindigkeit des Wassers zwischen 1,0 und 1,3 m/sec empfohlen. Lokale Siedevorgänge im Kühler sind somit ausgeschlossen. Andererseits sollte die Strömungsgeschwindigkeit auch nicht schneller sein, da sonst Korrosionsvorgänge deutlich zunehmen. Die Strömungsgeschwindigkeit berechnet sich wie folgt:

$$V = \frac{Q}{A}$$

- V= Strömungsgeschwindigkeit in $^m/_s$
- Q= Wassermenge in $^{m^3}/_s$
- A= Querschnittsfläche des Kupferröhrchens in m^2

Pro kW Verlustleistung sollte eine Wassermenge Q von 1 l/min = $1.67 \cdot 10^{-5}$ $^{m^3}/_s$ angesetzt werden. Es genügt der Ansatz der durchschnittlichen Verlustleistung, welche bei CW/SSB deutlich niedriger liegt. In der vorliegenden PA mit der GS35 wurde statt 1,5 KW ein Wert von 0,9 KW angesetzt, was 900ml/min Wasserdurchsatz verlangt. Der Durchflußquerschnitt eines Röhrchens mit 4mm Innendurchmesser beträgt:

$A = D^2 \cdot \pi/4 = 1{,}26 \cdot 10^{-5}\ m^2$

Daraus folgt

$$V = \frac{0{,}9 \cdot 1{,}67 \cdot 10^{-5}}{1{,}26 \cdot 10^{-5}} = 1{,}2\ ^m/_s$$

Als größte Schwierigkeit gestaltet sich die Auswahl der richtigen Pumpe, da der hohe hydraulische Verlust des gesamten Kühlsystems schwer vorher bestimmbar ist. Eine Pumpe, die nominell mit 10 l/min angegeben ist, befördert in vorliegendem Kühlsystem gerade mal 900ml/min. Die Pumpen müssen also deutlich überdimensioniert werden. Stellt sich heraus, daß zuviel Wassermenge befördert wird, ist das kein Problem. Die Strömungsgeschwindigkeit darf nur nicht zu groß werden. Längere Schlauchleitungen erhöhen in diesem Fall die hydraulischen Verluste und die Isolation der Leitungen wird zudem besser.

Mittels dieses Testaufbaus läßt sich auch die Wirkung des Kühlsystems und die erforderliche Gesamtwassermenge vorab bestimmen:

Der Kühlkreislauf wird wie vorgesehen aufgebaut, jedoch wird kein Ausgleichsbehälter eingefügt. Stattdessen wird anstelle des Anodenkühlers ein Wasserkocher oder ein Behälter mit Tauchsieder eingesetzt. Der Wasserinhalt entspricht dem des Ausgleichsbehälters, die elektrische Leistung der Anodenverlustleistung der Röhre. (z.B. 1KW Wasserkocher).

Nach 20 min hatte sich das Wasser bei unserem Versuchsaufbau von 20 Grad auf ca. 42 Grad erhöht. Die Asymptote der Temperatur lag bei 45 Grad. Anwender, welche nie über längere Abschnitte Betrieb machen, können evtl. bei entsprechender Wassermenge ganz ohne Lüfter am Wärmetauscher auskommen. Bei Kontestbetrieb ist eine größere Wassermenge und ein großzügigerer Kühler vorteilhaft. Ich verwende ca. 3,0 l Gesamtwassermenge, nach 3h EME erreiche ich ca. 40 Grad. Diese Temperatur erhöht sich bei 50% RX, 50% TX nicht mehr weiter. Mehr als 50 Grad Wassertemperatur sollten unbedingt aus Korrosionsgründen vermieden werden.

5. Der Betrieb

Sind die angesprochenen Versuche erfolgreich abgeschlossen, erfolgt der eigentliche Aufbau. Der Ausgleichsbehälter sollte nicht ganz gefüllt werden, so daß Luftblasen aus dem Wasser entweichen können. Der Wasserspiegel im Ausgleichsbehälter ist der höchste Punkt im Wasserkreislauf! "Luftfallen" und Einschlüsse bei der Leitungsführung sind zu vermeiden. Durch Neigen und Klopfen bei laufender Pumpe werden alle Luftblasen entfernt. Nach ein paar Stunden Betrieb wird das Wasser bereits getauscht, da evtl. Produktionsrückstände in den verwendeten Werkstoffen das Wasser schnell verschmutzen. Zunehmende Leitfähigkeit während des Betriebs der Endstufe sind kein Grund zur Sorge. Zunehmende Erwärmung führt zu erhöhter Teilchenbeweglichkeit und somit zu verbesserter Leitfähigkeit. Nach der Abkühlung ist der Effekt wieder verschwunden. Das uA-Meter dient als Anzeige.

Eingangskammer und die Keramikisolation zwischen Anode und Gitter werden beim Prototypen mittels kleinen Axiallüftern separat gekühlt. In der PA findet ein Lamda/2 Kreis Verwendung. Das ursprüngl. Luftgekühlte Konzept stammt aus St. Petersburg und wurde dankenswerter weise von DL1EJA zur Verfügung gestellt. Die Kühlschläuche laufen innerhalb des Rohres und verlassen die Anodenkammer auf der der Anode abgewandten Seite, also an einem "heißen" Teil des Kreises (Lamda/2 !). Auf eine Länge von 10cm durchlaufen die Wasserleitungen ein starkes HF-Feld innerhalb eines Teflonzylinders (Foto 5) Die PA erreicht einen Wirkungsgrad von ca. 55%. Laut Informationen von Funkfreunden, die das Konzept luftgekühlt verwenden, sind deutlich mehr als 60% möglich. Möglicherweise ist die Wasserkühlung dafür verantwortlich. Ein Herausführen der Leitungen am Lamda/4 Punkt (kalt) könnte Verbesserungen bringen.

Weitere Probleme macht das Messen des Gitter- und Anodenstroms nach herkömmlicher Methode über eine hochgelegte B+-Leitung. Offensichtlich führt der zusätzliche Gleichstrompfad von der Anode nach Masse zu einer Beeinflussung der Zenerdiodenersatzschaltung in der Kathodenzuleitung, welche auf Ub- Potential liegt,und die Anodensicherung brennt bei PTT lautstark durch. Abhilfe schafft das Messen des Anodenstroms von der Ub- Leitung nach Masse. Von der Masse zur Kathode wird der Kathodenstrom gemessen. Der Gitterstrom wird über die Differenz bestimmt. Mit echtem Massebezug auf der Kathodenebene ist das Problem nicht mehr vorhanden.

Die PA läuft seit 5 Monaten problemlos, nach 2 Wasserwechseln ist die Leitfähigkeit annähernd stabil. Dennoch gilt es, das Langzeitverhalten der verwendeten Materialien im Auge zu behalten. Die Verbindung von Wasser und Hochspannung erfordert ein erhöhtes Maß an Vorsicht, somit dürfte ein derartiges Projekt wohl nur auf diesem Gebiet erfahrenen Selbstbauern zu empfehlen sein.

Ich würde mich über Erfolgsmeldungen oder Anregungen/Verbesserungen freuen.

Viel Spaß hinter der Werkbank!

6. Danksagung

Abschließend möchte ich nicht versäumen, den stillen Helfern aus meinem Ortsverband U01 an dieser Stelle einmal für die langjährige Unterstützung bei diversen Endstufenprojekten zu danken, allen voran DL1RCG, DG7RZ und DG6RB.

1. Introduction

Water cooling big tubes is an easy way to achieve quiet and reliable performance on EME. Useful are tubes where the anode radiator can be removed and exchanged to watertight jacket.

2. Why water Cooling?

In industrial applications water cooling is used for large tubes, in dusty environments and where low noise is premature. For EME especially the low noise level seems to be attractive.

Also water cooling allow for higher levels of plate dissipation. It has a rating of 100W/cm^2 in comparison 30...60 W/cm^2 for

forced air cooling. Nevertheless higher output power may not be feasible, because there are different limiting factors like safe values for grid and anode current. Also special attention should be taken to the cooling of grid rings and the cathode of the tube. At this points there are temperature sensitive joints of metal and ceramic. They have to be cooled by additional blowers anyway.

3. Design Alternatives.

In this design a closed loop cooling system was preferred to an open loop system. The closed loop system can be used with destilled water, which cares for the necessary isolation of the high anode voltage. The use of destilled water implies a careful selection of materials in the cooling system. Certain materials are prone to ion exchange. This ruins the pieces made from this material immediately and disturbs the purity of the cooling water.

4. The cooling System

Fig. 4 gives a sketch of the cooling loop. The main point is, how to do the isolation of the anode voltage.

The anode cooler

There is only one choice for the material of the anode cooler, i.e. copper. After removal of the air cooler, a cylinder made from brass is fitted to the core of the tube (Photo 2 shows a modified GS35). Then this cylinder is covered by 5...7 turns of copper tubing with mm ID. To enhance the heat flow from the anode to the copper tubing a second ring is fitted to the assembly (Photo 3) and the gap is filled with tin. This gives a very low heat resistance. A second advantage is that the cooling water is only in contact to copper but all mechanical parts can be easily machined from brass.

Pipes

The pipes must be made from insulating plastics. Black rubber or plastic pipes are not recommended. Instead so call Vinyl-Pies are a good choice. These can be obtained for home-production of wine or for in-house fountains. There are made from transparent plastic. Also fittings like joints and crosses are obtainable which are made from Nylon. You need about 0.5...1m of pipe per kV of anode voltage.

After two runs of adequate lengths of Vinyl-pipes the system has to be grounded. Two short pieces of copper pipe are soldered to a mounting plate. These plates are grounded and connected to the plastic pipes. One quarter from the 'cold' end a third copper pipe is inserted and connected to µA-meter. This serves an instrument to measure the purity of the cooling water. If the indication rises after some time you have to exchange the water.

The heat exchanger

For the heat exchanger you can use a car heat exchanger or an oil cooler, the smaller the better. An axial blower is fine to get a higher efficiency.

The pump

For the water pump you use anything what is used for small room fountains. Self propelling pumps are hard to obtain. A static pressure obtained by a higher tank and the pump at its bottom may help.

Some formulas help with the design of cooling system. Length of the pipes is about 1m/kV anode voltage. The velocity of the water should be about 1.2m/s. Local vaporisation is unlikely with this velocity.

The velocity is determined by

$$V = \frac{Q}{A}$$

- V= Velocity in $^{m}/_{s}$
- Q= Water flow in $^{m^3}/_{s}$
- A= Cross-section of pipe in m^2

Per kW of anode dissipation a water flow of 1l/min. is required. This amounts to $1.67 \cdot 10^{-5}$ $^{m^3}/_{s}$. For 900W of dissipation in a GS35 this results in the following numbers:

$$A = D^2 \cdot \pi/4 = 1{,}26 \cdot 10^{-5}\ m^2$$

It follows

$$V = \frac{0{,}9 \cdot 1{,}67 \cdot 10^{-5}}{1{,}26 \cdot 10^{-5}} = 1{,}2\ m/s$$

Be aware of the power of the pump. Because of the long runs of low cross-section of the pipes high back pressure is building up. It makes sense to overrate the pump heavily and follow a cut and try approach to determine the amount of water stored in the tank.

In my system I use 3l of water. After 3h of EME (50% duty cycle RX/TX) the temperature rises to 40°C. If the temperature is higher than 50°C there is a considerable danger of corrosion. This has to be avoided.

5. Operation

After the construction the filling of the system follows. Try to infuse as less air as you can. After all you have to run the pump for a while and try to get rid of the air blobs in the system.

After some hours the water has to be renewed, because all the remaining rubbish in the system has been collected by the first filling.

When the temperature rises also the indication of the Ammeter will rise. This is normal.

The current PA has a half-wavelength anode line on 144MHz (Photo 7). The electrical construction is a Russian one from St. Petersburg. Additional blowers cool the grid ring and the cathode. (Photos 5 and 6). Efficiency is about 55%.

Some problems can arise by conventional techniques to measure anode and grid current of the tube. The second DC-path from Anode to ground blows the conventional power zener bias in the cathode.

Now an Ammeter is inserted from cathode to ground for anode current. A second is inserted from B- to ground for cathode current. The grid current is determined by taking the difference of both.

6. Acknowledgement

I appreciate the work of my amateur friends DL1RCG, DG7RZ and DG6RB.

7. References/Literatur

(1): P. Wetzel, O. Zender; BBC Brown Boveri; Industrieröhren in Hochfrequenzgeneratoren

(2): Chip Angle, N6CA; ARRL Handbook 1987; A Quarter Kilowatt 23-cm Amplifier